

EVALUASI STRUKTUR GEDUNG X DI JAKARTA BERDASARKAN SNI 03-1726-2012 KETAHANAN GEMPA UNTUK STRUKTUR GEDUNG

Sayed Ahmad Fauzan¹, Erizal², Asep Sapei²

Abstract

Jakarta region are in the middle earthquake zoning map based seismic zonation 2010, published by the Center for Research and Development of Settlements (PUSKIM), Ministry of Public Works. The purpose of this study was to recommend strengthening the existing structure of the building X in Jakarta, so that when the earthquake comes, the structure of the building was still able to bear the ultimate burden. The object of research is building high rise building category, has a number of more than 10 floors, built before 2010, located on soft soil site grade and visually indicated the existence of damage to the structural elements. Modelling of the structure X was designed and analyzed using ETABS program. Given the dynamic earthquake loading procedure using the response spectrum analysis of variance. Results of the analysis showed that the story drift X building is declared safe to limit ultimate performance which has been calculated based on the guidelines of earthquake SNI 03-1726-2012. The maximum value of deviation between floors in the building for the X-direction by 68.60 mm x and y-direction amounted to 101.2 mm. However, the results of the analysis of the structure of the building modeling X in ETABS indicates that there are some elements of the beams and columns that require retrofiting of structures. Retrofitting is planned to use CFRP beam elements calculated safety guideline ACI 440.2R-8 column element retrofitting is planned to use Concrete Jacketing analyzed through the designer section in ETABS program and its security is calculated based on the guidelines SNI 03-2847-2013.

Keywords: Building, earthquake, Evaluation, SNI 03-1726-2012, Retrofitting.

Abstrak

Wilayah Jakarta berada pada zonasi gempa menengah berdasarkan peta zonasi gempa 2010 yang dipublikasikan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman (PUSKIM), Kementrian Pekerjaan Umum. Tujuan penelitian ini adalah merekomendasikan perkuatan struktur pada eksisting gedung X di Jakarta, agar ketika gempa datang, struktur gedung tersebut tetap mampu memikul beban ultimit. Objek penelitian merupakan gedung kategori *high rise building*, memiliki jumlah lantai lebih dari 10, dibangun sebelum tahun 2010, berlokasi pada kelas situs tanah lunak dan secara visual terindikasi adanya kerusakan pada elemen struktur. Pemodelan struktur gedung X didesain dan dianalisis menggunakan program ETABS. Pembebanan gempa diberikan secara dinamik menggunakan prosedur analisis spektrum respons ragam. Hasil analisis *story drift* menunjukkan bahwa gedung X dinyatakan aman terhadap kinerja batas ultimit yang telah dihitung berdasarkan pedoman gempa SNI 03-1726-2012. Nilai maksimum simpangan antar lantai pada gedung X untuk arah-x sebesar 68,60 mm dan arah-y sebesar 101,2 mm. Bagaimanapun, hasil analisis struktur pemodelan gedung X pada ETABS menunjukkan bahwa terdapat beberapa elemen balok dan kolom yang membutuhkan perkuatan struktur. Perkuatan elemen balok direncanakan menggunakan CFRP yang dihitung keamanannya berdasarkan pedoman ACI 440.2R-8 Perkuatan elemen kolom direncanakan menggunakan *Concrete Jacketing* yang dianalisis melalui *section designer* pada program ETABS dan dihitung keamanannya berdasarkan pedoman SNI 03-2847-2013.

Kata Kunci : Gedung, Gempa, Evaluasi, SNI 03-1726-2012, Perkuatan.

1. PENDAHULUAN

BSN (2012) Pedoman SNI 03-1726-2012 tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung merupakan revisi dari SNI 03-1726-2002. SNI 03-1726-2012 disusun oleh Badan Standardisasi Nasional Indonesia yang

didasarkan pada acuan referensi internasional seperti *Federal Emergency Management Agency (FEMA P-7502009)*, *National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP)*, *2009 International Building Code (2009 IBC)* dan *American Society of Civil Engineers (ASCE / SEI 7-10)*.

¹ Mahasiswa S2 Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan IPB

² Komisi Pembimbing Program Studi Teknik Sipil dan Lingkungan IPB

SNI 03-1726-2012 telah menggunakan peta riwayat gempa terbaru tahun 2010, sehingga bangunan gedung yang dibangun sebelum tahun 2010 perlu dilakukan evaluasi struktur untuk mengetahui keamanan struktur menurut standar yang baru. Perbedaan pedoman perencanaan gedung untuk ketahanan gempa SNI 03-1726-2002 dan SNI 03-1726-2012, yaitu desain percepatan spektral gempa SNI 03-1726-2012 di beberapa wilayah Indonesia mengalami kenaikan pada jenis kelas situs tanah sedang dan tanah keras sedangkan penurunan pada jenis kelas situs tanah lunak (Arfiandi dan Satyarno 2013). Secara visual, kerusakan struktural maupun non-struktural pada elemen gedung juga dapat menjadi indikasi perlunya kajian evaluasi struktur pada gedung tersebut.

Penelitian ini membahas tentang evaluasi tentang ketahanan gempa struktur gedung pada gedung X di wilayah Jakarta, dibangun sebelum tahun 2010 dan terletak pada kelas situs tanah lunak. Hasil studi observasi melalui pengamatan visual pada gedung X menunjukkan bahwa terdapat beberapa kerusakan non-struktural pada lantai basement, sehingga perlu dilakukan kajian evaluasi struktur gedung untuk mengetahui kemampuan struktur gedung dalam memikul beban yang bersifat statik dan dinamik. Pengamatan observasi visual tersebut menjadi analisa awal untuk dilakukannya penelitian tentang studi evaluasi struktur gedung, sehingga akan diketahui kondisi keamanan struktur tersebut menurut standar perencanaan struktur yang baru.

Gedung yang dibangun sebelum tahun 2012 tersebut tentu direncanakan dengan matang oleh konsultan perencana, namun dalam hal pengawasan dan pengelolannya, gedung tersebut harus tetap dievaluasi oleh tim ahli struktur gedung sepanjang gedung tersebut berdiri, agar diketahui kondisi kinerja struktur gedung tersebut untuk masa sekarang. Hal ini yang mendasari perlu dilakukannya penelitian tentang evaluasi kinerja struktur gedung-gedung bertingkat tinggi di Jakarta yang dibangun sebelum tahun 2012. Tujuan dari kajian evaluasi struktur gedung yaitu, merekomendasikan perbaikan ataupun perkuatan elemen struktur bangunan, sehingga diharapkan ketika beban gempa datang, bangunan tersebut tetap mampu memikul beban gempa dan meningkatkan kinerja batas ultimit.

Pemodelan struktur gedung dapat dianalisis dengan menggunakan program *ETABS* dan *SAP 2000*, program ini sangat membantu perencana struktur untuk mengambil data hasil analisis struktur berupa gaya-gaya dalam yang dapat digunakan untuk mengevaluasi dan menghitung metode perbaikan struktur.

2. TINJAUAN PUSTAKA

PEMBEBANAN STRUKTUR

Kegagalan struktur pada bangunan gedung terjadi akibat ketidakmampuan elemen struktur gedung dalam memikul beban-beban yang bekerja pada struktur, sehingga dalam perencanaan struktur gedung harus dipersyaratkan bahwa kekuatan nominal penampang elemen struktur harus lebih besar dari kekuatan beban ultimit. Pembebanan dalam struktur gedung harus mempertimbangkan beban yang bersifat statik dan dinamik.

BEBAN STATIK

Beban Statis adalah beban yang memiliki perubahan intensitas beban terhadap waktu berjalan lambat atau konstan, contohnya pembebanan yang telah ditetapkan PPPURG 1989 (Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Rumah dan Gedung) antara lain, beban hidup dan beban mati.

Beban Hidup

Beban hidup merupakan beban yang terjadi akibat penghunian atau penggunaan gedung tersebut, baik akibat beban yang berasal dari orang maupun dari barang yang dapat berpindah atau mesin dan peralatan serta komponen yang tidak merupakan bagian yang tetap dari gedung. Beban hidup adalah semua beban tidak tetap atau dapat berpindah. Beban hidup yang diperhitungkan terdiri atas, beban hidup pada lantai gedung dan beban hidup pada atap gedung.

Beban Mati

Beban mati merupakan berat sendiri dari semua bagian yang bersifat tetap. Beban mati yang diperhitungkan terdiri atas, berat sendiri kolom, berat sendiri balok-balok yaitu: balok *sloof*, balok anak, balok induk, *ringbalk*, berat penutup atap, beban dinding dan beban pelat lantai dan plafon.

Beban Dinamik

Beban dinamik adalah beban dengan variasi perubahan intensitas beban terhadap waktu yang cepat. Beban dinamis antara lain, beban angin dan beban gempa.

Beban Angin

Beban angin (tekanan angin) ditentukan dengan menganggap adanya tekanan positif dan tekanan negatif yang bekerja tegak lurus pada bidang-bidang yang ditinjau. Besarnya tekanan positif dan negatif ini dinyatakan dalam kg/m^2 .

Beban Gempa

Pristiwa gempa menimbulkan getaran akibat benturan/pergeseran kerak bumi yang menjalar dalam bentuk gelombang. Pada saat getaran menjalar pada bangunan, maka akan timbul gaya inersia, karena adanya faktor beban dari massa bangunan untuk mempertahankan dirinya dari gerakan. Besar gaya inersia bangunan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain, massa bangunan, kekakuan struktur, jenis tanah, periode getar alami dan wilayah kegempaan.

Proses terjadinya gempa bumi disebabkan oleh faktor gempa alam dan faktor gempa buatan. Gempa yang diakibatkan faktor alam misalnya gempa vulkanik, gempa tektonik dan gempa runtuh, sedangkan faktor buatan adalah gempa yang diakibatkan oleh kegiatan manusia seperti peledakan nuklir, bom ataupun dinamit. Getaran pada gempa bumi menyebabkan adanya pelepasan energi berupa gelombang elastik atau yang disebut gelombang seismik, sehingga menyebabkan keruntuhan atau kegagalan struktur bangunan (Budiono dan Supriatna 2011).

Percepatan getaran tanah akibat gempa bumi merupakan nilai percepatan dasar untuk mendesain struktur bangunan tahan gempa. Naeim (1989) menyatakan bahwa terdapat tiga karakteristik gempa bumi yang diperlukan untuk mendesain struktur tahan gempa antara lain:

- 1) Nilai maksimum gerakan gempa yaitu nilai maksimum percepatan gempa/*peak ground acceleration*, nilai maksimum kecepatan gempa/*peak ground velocity* dan nilai maksimum perpindahan tanah/*peak ground displacement*.
- 2) Lama waktu terjadinya gempa atau durasi.

- 3) Rentang frekuensi gempa.

BSN (2012) Perbedaan gempa rencana antara SNI 03-1726-2002 dan SNI 03-1726-2013 antara lain:

SNI 03-1726-2002, zonasi peta gempa menggunakan peta gempa untuk probabilitas 10% terlampaui dalam 50 tahun atau memiliki periode ulang 500 tahun, sedangkan SNI 03-1726-2012, zonasi peta gempa menggunakan peta gempa untuk probabilitas 2% terlampaui dalam 50 tahun atau memiliki periode ulang 2500 tahun.

BSN (2012) Prosedur yang diizinkan dalam pembebanan gempa berdasarkan SNI 03-1726-2012 antara lain: analisis gaya lateral ekuivalen, analisis spektrum respons ragam dan analisis riwayat respons seismik.

Evaluasi Gaya Geser Dasar Seismik Respon Spektrum

Berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 7.9.4.1, apabila nilai gaya geser dasar seismik respon spektrum (V_t) lebih kecil 85% dari gaya geser dasar yang dihitung menggunakan prosedur gaya lateral ekuivalen (V_1), maka nilai gaya V_t harus dikalikan $(0,85V_1)/V_t$.

Faktor redudansi (ρ) untuk Pembebanan Gempa

Berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 7.3.4.2, untuk struktur yang dirancang untuk kategori desain seismik D, E atau F, maka nilai ρ harus sama dengan 1,3 artinya apabila ditemukan pada lantai tertentu tidak memenuhi nilai 35% dari V_t , maka nilai gaya geser lantai tiap lantai harus dikalikan dengan nilai $\rho = 1,3$. Jika tiap lantai telah memenuhi 35% dari V_t , maka diizinkan nilai $\rho = 1$.

Analisis Story Drift atau Kinerja Batas Ultimit

BSN (2012) Berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 7.8.6, penentuan simpangan antar lantai tingkat desain (Δ) harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat teratas dan terbawah yang ditinjau. Perpindahan pusat massa di tingkat x (δ_x) (mm) ditentukan melalui persamaan (1),

$$\delta_x = \frac{C_d \cdot \delta_{xe}}{I_e} \quad (1)$$

Keterangan:

C_d = Faktor amplifikasi defleksi (Tabel 9 pada SNI 03-1726-2012 pasal 7.2.2)

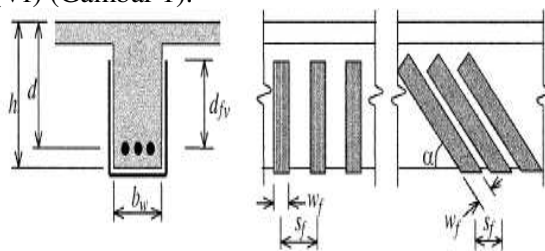
δ_{xe} = Defleksi antar tingkat

I_e = Faktor keutamaan gempa (SNI 03-1726-2012 pasal 4.1.2)

Metode Perbaikan Struktur

Pemilihan metode *retrofitting*/perbaikan pada struktur gedung yang mengalami kegagalan struktur perlu ditinjau dari segi tingkat kerusakan, yaitu kerusakan struktural dan kerusakan non-struktural. Kerusakan struktural misalnya lendutan pada balok ataupun pelat, retak secara menyeluruh, sehingga menyebabkan terkelupasnya selimut beton, retak pada joint kolom-balok, dan penurunan pondasi. Jenis kerusakan non-struktural misalnya retak rambut pada balok, dinding ataupun elemen struktur lainnya. nilai retak rambut tersebut kurang dari 0,20 mm, maka metode perbaikan bisa dilakukan dengan cara *grouting*.

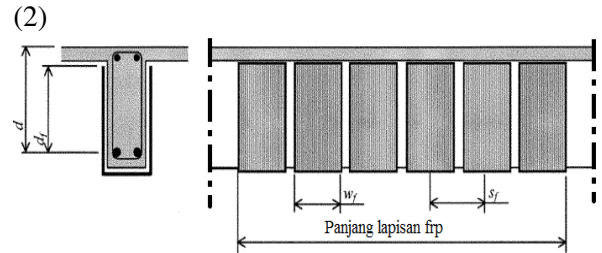
Christiawan *et al.* (2008) merekomendasi perbaikan elemen struktur eksisting dengan lapisan *FRP* (*Fiber Reinforcement Polymer*) sebagai langkah upaya meningkatkan kinerja struktur beton pada balok, kemudian pada kolom diberikan tambahan selimut beton. El-Sayed (2014) pemberian lapisan perkuatan menggunakan *CFRP* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) dapat meningkatkan kemampuan balok dalam memikul gaya geser. ACI (1998) Penggunaan *FRP* (*Fiber Reinforced Polymer*) dapat diperhitungkan sebagai perkuatan struktur. Pedoman ACI 440.2R-08, telah menjelaskan bahwa perkuatan gaya geser nominal menggunakan *FRP* dapat diperhitungkan dengan menambahkan kontribusi nilai gaya geser yang dapat ditahan oleh lapisan *FRP* (V_f) (Gambar 1).



Gambar 1. Bentuk tipe pemasangan lapis FRP menurut ACI 440.2R-08

Faktor reduksi juga diperhitungkan ketika memasang lapisan *FRP* (ψ_f). Nilai faktor reduksi untuk bentuk pemasangan lapisan *FRP* diantaranya: $\psi_f = 0,85$ untuk pemasangan pada dua atau tiga sisi balok dan $\psi_f = 0,95$ untuk pemasangan seluruh sisi. Persyaratan kuat nominal balok *FRP* harus memenuhi persamaan (2) dan dihitung nilai S_f dan W_f berdasarkan ACI 440-2R-08 (Gambar 2).

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f)$$



Gambar 2. Jarak antar lapisan *FRP* (S_f) dan lebar lapisan *FRP* (W_f) berdasarkan ACI 440.2R-08

3. METODOLOGI

Waktu dan Lokasi Penelitian

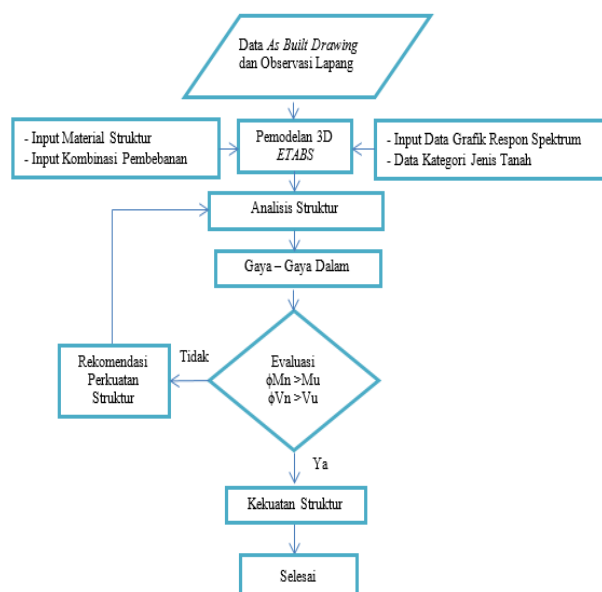
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni 2014 sampai Juni 2015. Gedung yang menjadi objek penelitian adalah gedung yang dibangun sebelum tahun 2010 dan terletak pada kondisi jenis kelas situs tanah lunak. Gedung tersebut merupakan salah satu gedung perkantoran di wilayah Jakarta Timur.

Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan berupa data primer dan sekunder. Data primer meliputi pedoman perencanaan dan evaluasi struktur gedung sesuai Badan Standardisasi Nasional Indonesia (BSN). Data sekunder yaitu gambar teknik *as built drawing*, gambar arsitektur dan peta klasifikasi jenis tanah DKI Jakarta. Alat yang digunakan untuk mengetahui nilai mutu beton yaitu alat *Hammer Test*. Perangkat lunak Program SAP 2000 versi 11 dan ETABS (*Extended Three Dimensional Analysis of Building System*) versi 9.7.2 digunakan sebagai alat bantu dalam pembuatan pemodelan struktur dan analisis struktur gedung.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang penulis lakukan dalam studi ini, antara lain: studi literatur, pengumpulan data, observasi lapang, uji hammer test, desain percepatan respon spektra, kombinasi pembebanan, pemodelan struktur, analisa struktur, evaluasi keamanan struktur, rekomendasi perkuatan struktur dan kekuatan struktur. Prosedur penelitian dapat dilihat melalui gambar alur prosedur penelitian (Gambar 3).



Gambar 3. Alur prosedur penelitian

1. Studi literatur

Mengumpulkan referensi tinjauan pustaka yang mendukung kegiatan studi penelitian.

2. Pengumpulan Data

Data-data yang menjadi pendukung dalam penelitian ini adalah gambar *as built drawing*, gambar arsitektur dan referensi tentang peta kelas situs jenis tanah. Deskripsi bangunan model gedung; Struktur atap lantai 12 menggunakan konstruksi baja; elevasi tertinggi yaitu +56,50 m dan elevasi terendah yaitu -6,40 m; jumlah tingkat sebesar 14 lantai dan 1 lantai penthouse dan atap penthouse; tinggi lantai tipikal yaitu 4,00 m dan tinggi lantai basement sebesar 3,20 m. Luas bangunan yaitu 4.735,71 m². Mutu baja yang digunakan untuk tulangan beton adalah 240 MPa untuk baja berdiameter lebih kecil dari 12 mm dan 390 MPa untuk baja berdiameter lebih besar dari 12 mm. Mutu beton yaitu K-350 atau setara 29,05 MPa.

3. Observasi lapang dan Uji Hammer test

Pengecekan kondisi eksisting gedung dilakukan melalui pengamatan visual dan uji hammer test. Hammer test merupakan suatu pengujian tanpa merusak (*non-destructive*) untuk mengetahui kualitas mutu dari suatu struktur beton (Snell 2012). Studi observasi kondisi eksisting gedung X melalui pengamatan visual, tidak ditemukan kerusakan struktural, namun ditemukan beberapa kerusakan non-struktural atau kerusakan ringan, diantaranya: retakan pelat lantai basement 1, pengelupasan selimut beton

pada dinding lantai basement 1, dinding rembes pada lantai basement 1, dan pengelupasan selimut beton pada balok lantai basement 1. Hasil observasi visual tersebut diharapkan menjadi analisa awal untuk kegiatan uji *hammer test*.

Gambar *as built drawing* menunjukkan bahwa mutu beton yang digunakan pada saat pelaksanaan merupakan K-350 atau setara 29,05 MPa. Pada saat dilakukan uji mutu beton pada objek penelitian, didapatkan rata-rata nilai mutu beton lebih besar dari 29,05 Mpa. Pengujian dilakukan dengan mengambil 5 sampel titik uji pada objek element struktur, kemudian dihitung nilai rata-rata yang sudah otomatis terlihat pada alat *hammer test*.

4. Desain percepatan respon spektra

Respon spektrum merupakan grafik hubungan nilai puncak respons struktur percepatan akibat eksitasi gempa sebagai fungsi dari periode natural sistem struktur. Spektrum gempa dibuat berdasarkan peta gempa Indonesia 2010. Pembuatan spektrum gempa disesuaikan dengan letak geografis dan kategori kelas jenis situs tanah bangunan. Lokasi yang menjadi objek penelitian ini adalah wilayah DKI Jakarta. Berdasarkan peta klasifikasi tanah DKI Jakarta menurut Asrurifak *et al.* (2013) pada lokasi objek penelitian (gedung X) termasuk dalam kategori jenis kelas situs tanah lunak (SE). Berdasarkan peta zonasi gempa SNI 03-1726-2012, nilai percepatan batuan dasar 1 detik (S_1) untuk daerah Jakarta berkisar antara 0,25-0,3 g dan nilai percepatan batuan dasar 0,2 detik (S_s) untuk daerah Jakarta berkisar antara 0,6-0,7 g.

5. Kombinasi pembebanan

Kombinasi pembebanan dimasukkan kedalam pemodelan, sesuai PPPURG 1989 (Pedoman Peraturan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung) dan pembebanan gempa yang diberikan secara dinamik respon spektrum berdasarkan SNI 03-1726-2012.

Berikut ini detail kombinasi pembebanan untuk beban mati nominal, beban hidup nominal dan beban gempa nominal yang diinput pada pemodelan *ETABS* berdasarkan SNI 03-1726-2012 Pasal 7.4.2. Pembebanan gempa harus memenuhi prosedur kombinasi ortogonal ditetapkan 100% gaya untuk satu arah ditambah 30% gaya untuk arah tegak lurus.

1) 1,4DL

- 2) $1,2DL + 1,6LL + 0,5Lr$
- 3) $1,2DL + 1,6Lr + 1LL$
- 4) $1,2DL + 1WL + 1LL + 0,5Lr$
- 5) $1,2DL + 1,1LL \pm 0,3(\rho QE + 0,2S_{DS}.DL) \pm 1(\rho QE + 0,2S_{DS}.DL)$.
- 6) $1,2.DL + 1,1LL \pm 1(\rho QE + 0,2S_{DS}.DL) \pm 0,3(\rho QE + 0,2S_{DS}.DL)$.
- 7) $0,9DL + 1WL$
- 8) $0,9.DL \pm 0,3(\rho QE - 0,2S_{DS}.DL) \pm 1(\rho QE - 0,2S_{DS}.DL)$.
- 9) $0,9 DL \pm 1(\rho QE - 0,2.S_{DS}DL) \pm 0,3(\rho QE - 0,2S_{DS}.DL)$.

6. Pemodelan Struktur

Program yang digunakan untuk mendesain dan menganalisis model struktur gedung yaitu *software* analisis struktur *ETABS (Extended Three Dimensional Analysis of Building System)* versi 9.7.2. dan untuk struktur atap kuda-kuda digunakan *SAP 2000* versi 11. Pemodelan diawali dengan menggambarkan elemen struktur pada grid-grid arah tiga dimensi, sumbu x y, dan z. Pemodelan dilanjutkan dengan menginput material struktur.

7. Analisis Struktur

Analisis pembebanan yang diperhitungkan pada pemodelan struktur ini, diantaranya pembebanan statik berdasarkan PPPURG 1989 dan pembebanan dinamik gempa berdasarkan SNI 03-1726-2012. Sebelum hasil analisis struktur digunakan, diperlukan cek kontrol partisipasi massa hingga mencapai 90%. Hasil analisis dalam penelitian ini terbagi tiga, antara lain; pertama yaitu hasil analisis *story drift* akibat pembebanan gempa yang dihitung berdasarkan SNI 03-1726-2012 menggunakan prinsip kinerja batas ultimit struktur sehingga nantinya diperoleh nilai perpindahan/*displacement* dan nilai *story drift* (simpangan antar lantai); kemudian kedua yaitu hasil analisis struktur atap dan ketiga yaitu hasil analisis struktur gedung. Hasil dari analisis struktur akan menghasilkan gaya-gaya dalam, antara lain: gaya momen, geser, torsi dan axial yang menjadi sumber data untuk mengevaluasi keamanan struktur.

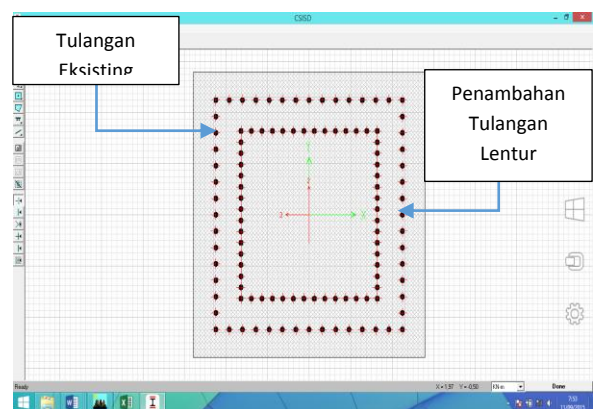
8. Evaluasi Keamanan Struktur

Persyaratan keamanan struktur harus didesain dengan prinsip kekuatan nominal penampang struktur harus lebih besar dari kekuatan beban ultimit. Apabila hasil analisa struktur elemen struktur pada pemodelan *ETABS/SAP 2000* tidak aman, maka harus dilakukan rekomendasi perkuatan struktur

agar diperoleh dimensi perkuatan struktur yang aman sesuai standar keamanan pedoman SNI 03-2847-2013 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.

9. Rekomendasi Perkuatan Struktur

Analisis rekomendasi perkuatan struktur balok dapat menggunakan metode pemasangan lapisan *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)*, berdasarkan pedoman *ACI 440.2R-08*. Analisis perkuatan struktur kolom dapat menggunakan metode *concrete jacketing column*. *Jacketing* dimodelkan melalui *figure section designer* pada *ETABS*, sebuah fitur yang dapat mendesain kolom dalam berbagai jenis bentuk (Gambar 4).



Gambar 4. Perkuatan kolom menggunakan *section designer* pada program *ETABS*.

10. Kekuatan Struktur

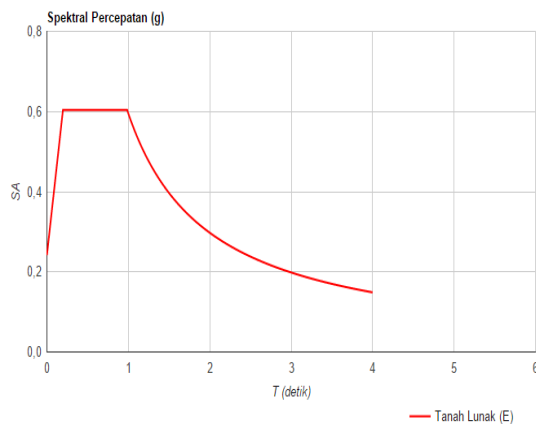
Tahap akhir dari prosedur penelitian adalah mengevaluasi kembali kemampuan atau kekuatan struktur setelah mendapatkan perkuatan struktur. Hasil perkuatan struktur akibat metode *concrete jacketing column* harus dievaluasi kembali untuk memastikan bahwa daya dukung pile masih mampu menahan beban aksial.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain percepatan respon spektral

Percepatan respons spektra dapat diperoleh dari hasil analisa website aplikasi desain spektra Pusat Penelitian dan Pengembangan Pemukiman (PUSKIM), Kementerian Pekerjaan Umum. Secara khusus, objek penelitian ini berlokasi di Jakarta Timur. Hasil analisis website PUSKIM untuk koordinat objek penelitian diperoleh antara lain: nilai percepatan batuan dasar 0,2 detik (S_s) = 0,667 g; percepatan batuan dasar 1

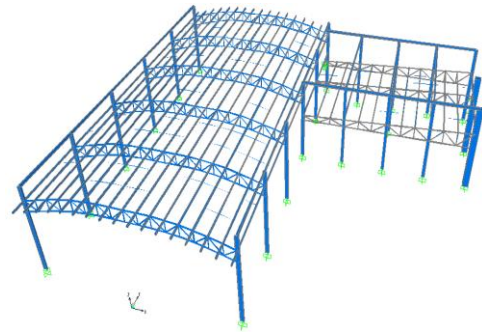
detik (S_1) = 0,293 g; spektrum respons percepatan pada periode pendek (S_{MS}) = 0,991 g; spektrum respons percepatan pada periode 1 detik (S_{M1}) = 0,929 g, percepatan spektral desain untuk periode pendek (S_{DS}) = 0,607 g; percepatan spektral desain untuk periode 1 detik (S_{D1}) = 0,553 g; Periode (T_s) = 0,901 s dan Periode (T_o) = 0,182 s (Gambar 5). Berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 6.5, tentang penentuan Kategori Desain Seismik (KDS), untuk nilai $SD_s = 0,607$ g, $SD_1 = 0,553$ g dan kategori risiko II (perkantoran), diperoleh jenis KDS Gedung X tergolong pada tipe D.



Gambar 5. Grafik desain percepatan respon spektrum.

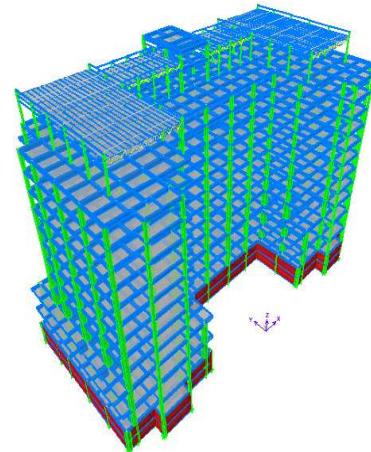
Pemodelan Struktur

Sistem rangka atap pada gedung X menggunakan kuda-kuda baja ringan. Profil untuk atap rangka baja lengkung menggunakan hollow. Profil rangka baja segitiga menggunakan hollow dan double angle. Profil balok dan kolom struktur menggunakan baja wide flange. Jenis mutu baja digunakan $F_y = 410$ Mpa dan $F_u = 550$ Mpa. Pemodelan sistem atap rangka baja berbentuk lengkung dan segitiga, pemodelan dibuat terpisah karena untuk mendekati karakteristik bangunan model sebenarnya dan lebih mudah didesain menggunakan program *SAP 2000* (Gambar 6).



Gambar 6. Pemodelan struktur atap baja pada lantai 12

Material struktur dimodelkan beton bertulang untuk balok, kolom dan pelat berdasarkan data gambar pelaksanaan *as built drawing*, serta untuk struktur pondasi dimodelkan sebagai tumpuan jepit dengan bantuan program *ETABS (Extended Three Dimensional Analysis of Building System)* versi 9.7.2. (Gambar 7).



Gambar 7. Pemodelan 3D struktur gedung pada program *ETABS*

Pembebanan dalam studi ini telah memasukkan pembebanan yang bersifat statik dan dinamik. Pembebanan statik yang diberikan, diantaranya: beban hidup dan beban mati berdasarkan PPPURG 1987. Pembebanan dinamik diantaranya terdiri dari beban angin dan beban gempa, namun beban angin pada struktur gedung tidak diberikan, karena kecepatan angin di wilayah objek penelitian tidak terlalu berpengaruh atau bernilai kecil. Prosedur pembebanan gempa yang diberikan menggunakan prosedur analisis ragam respons spektrum, karena gedung termasuk dalam Kategori Desain Seismik (KDS) tipe D.

Pembebanan secara dinamik melalui analisis prosedur respon spektrum ragam akan menghasilkan gaya geser dasar seismik ragam pertama (V_1) yang dihitung menggunakan

prosedur lateral ekuivalen. Nilai geser dasar seismik ragam pertama (V_1) diperoleh dengan cara mengalikan jumlah massa seluruh bangunan dan nilai koefisien dasar seismik (C_s). Nilai jumlah massa bangunan diperoleh melalui pemodelan pada program *ETABS* yaitu sebesar 327.240 kN dan nilai C_s diperoleh berdasarkan ketentuan SNI 03-1726-2012 pasal 4.1.2. Nilai C_s tersebut dipengaruhi oleh periode fundamental struktur (T_a) karena nilai T_a akan digunakan sebagai parameter untuk menghitung nilai koefisien dasar seismik (C_s). Nilai T_a dapat dihitung dengan batasan nilai minimum dan maksimum berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 7.8.2. Nilai T_a juga dapat diperoleh melalui hasil analisis pemodelan *ETABS*, antara lain: nilai T_a pada mode shape 1 untuk arah x dan T_a pada mode shape 2 untuk arah y. Nilai T_a yang diambil harus memenuhi ketentuan syarat bahwa nilai T_a harus lebih dari nilai minimum dan tidak perlu melebihi nilai maksimum (Tabel 1).

Tabel 1 Nilai periode getar fundamental (T_a)

Arah X (detik)		Arah Y (detik)	
minimum	= 1,94	Minimum	= 1,94
maksimum	= 2,71	maksimum	= 2,71
mode	= 2,97	mode	= 2,66
shape1		shape2	
diambil T_a -x	= 2,71	diambil T_a -y	= 2,66

Berdasarkan data Tabel 1, nilai T_a yang diambil harus terletak diantara interval nilai maksimum dan minimum, sehingga nilai periode yang diambil adalah nilai T_a maksimum untuk arah x = 2,71 s dan y = 2,71 s. Nilai T_a tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai C_s . Nilai C_s telah dihitung berdasarkan ketentuan SNI 03-1726-2012 pasal 4.1.2 (Tabel 2).

Tabel 2 Nilai koefisien dasar seismik (C_s)

Arah X (detik)		Arah Y (detik)	
minimum	= 0,027	Minimum	= 0,027
maksimum	= 0,121	maksimum	= 0,121
hitungan	= 0,042	hitungan	= 0,041
diambil C_s -x	= 0,042	diambil C_s -y	= 0,041

Berdasarkan data Tabel 2, nilai C_s yang diambil harus terletak diantara interval nilai maksimum dan minimum, sehingga nilai C_s yang diambil adalah nilai C_s hitungan, yaitu untuk C_s arah x = 0,042 dan C_s arah y = 0,041. Jika nilai massa yang telah diketahui

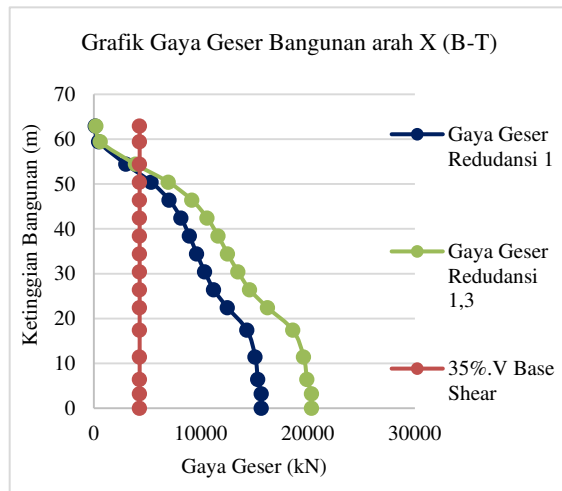
sebelumnya yaitu sebesar 327.240 kN dan nilai C_s yang juga telah diketahui, maka akan diperoleh untuk nilai V_1 arah-x = 13.614,54 kN dan V_1 arah-y = 13.345,93 kN.

Pemodelan *ETABS* yang akan dianalisis harus diberikan besaran skalar pada sumbu x untuk U1 dan sumbu y untuk U2 berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 11.1.4. Besaran skalar pada faktor skala *ETABS* dihitung melalui hasil perkalian nilai gravitasi bumi dan (I_e/R). Nilai R merupakan koefisien modifikasi respons yang diperoleh berdasarkan SNI 03-2847-2012 pasal 7.2.2. Nilai $R = 5$, karena sistem struktur penahan gaya seismik yang digunakan gedung X termasuk kategori sebagai sistem rangka pemikul momen menengah (SRPMM). Nilai I_e merupakan faktor keutamaan yang diperoleh berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 4.1.2. Nilai $I_e = 1,00$ karena gedung termasuk kategori risiko II (perkantoran). Jika nilai I_e dan R sudah diketahui maka dapat dihitung besaran skalar, sehingga diperoleh U1 arah x dan U2 arah y, keduanya sama-sama bernilai $1,962 \text{ m/s}^2$.

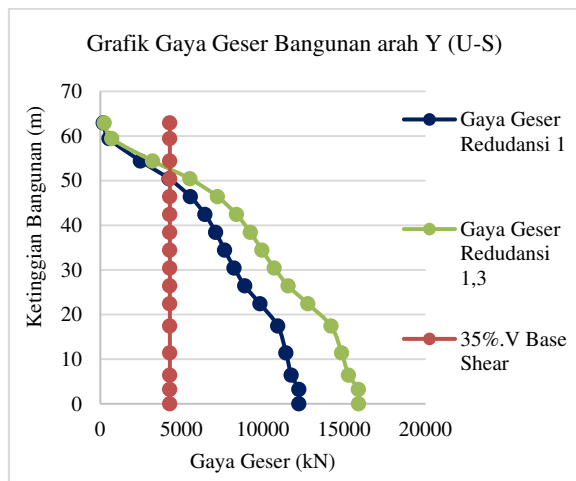
Pemodelan *ETABS* akan menghitung besarnya nilai gaya geser dasar seismik respon spektrum (V_t). Berdasarkan SNI 03-1726-2012 pasal 7.9.4.1 kombinasi respons untuk geser dasar ragam (V_t) yang lebih kecil 85 persen dari geser dasar yang dihitung (V_1) menggunakan prosedur gaya lateral ekuivalen, maka gaya V_t harus dikalikan dengan $(0,85V_1)/V_t$. Hasil analisis program *ETABS* menunjukkan nilai V_t arah x = 15.665,47 kN dan untuk V_t arah y = 12.221,68 kN, sehingga dari hasil analisis nilai V_1 dan V_t , diperoleh bahwa V_t lebih besar dari $0,85V_1$. Hal ini menunjukkan bahwa dalam pembebanan gempa untuk V_t tidak perlu faktor pengali dalam faktor skala.

Pembebanan gaya geser dasar seismik respon spektrum (V_t) juga harus memperhitungkan faktor reduksi yang disyaratkan SNI 03-1726-2012 pasal 7.3.4.2. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pada lantai atap sampai lantai 11, belum memenuhi 35% dari V_t , sehingga nilai V_t harus dikalikan dengan $\rho = 1,3$. Perhitungan nilai 35% V_{tx} untuk arah-x = 5.482,91 kN dan nilai 35% V_{ty} untuk arah-y = 4.277,59 kN. Hasil analisis pengaruh reduksi memperlihatkan bahwa nilai gaya geser lantai atau gaya gempa rencana menjadi lebih besar setelah diberikan faktor reduksi, agar desain struktur bisa

direncanakan lebih kuat (Gambar 8 (a) dan (b)).



(a)



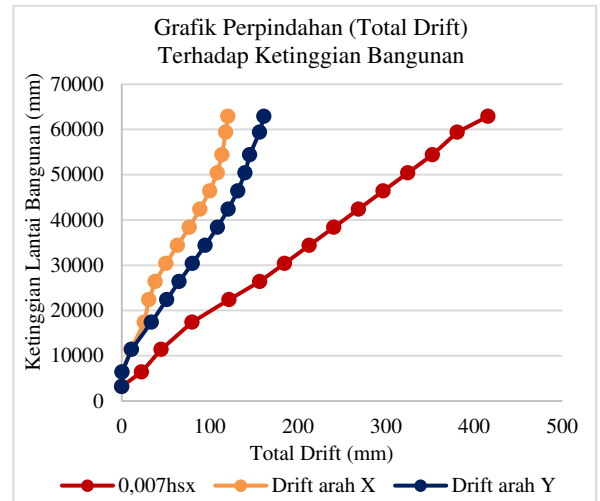
(b)

Gambar 8 Grafik Gaya geser bangunan pasai untuk (a) arah-x dan (b) arah-y

Hasil Analisis Struktur

1. Story Drift atau Kinerja Batas Ultimit

Hasil analisis pemodelan struktur gedung menunjukkan bahwa kinerja batas ultimit atau simpangan antar lantai tingkat masih memenuhi syarat batas izin simpangan antar tingkat $0,007h_{sx}$, dimana h_{sx} adalah ketinggian tingkat di bawah tingkat x. Nilai maksimum kinerja batas ultimit untuk arah x sebesar 68,60 mm dan arah y sebesar 101,20 mm (Gambar 9).



Gambar 9 Grafik perpindahan (*total drift*) terhadap ketinggian bangunan

2. Struktur Atap

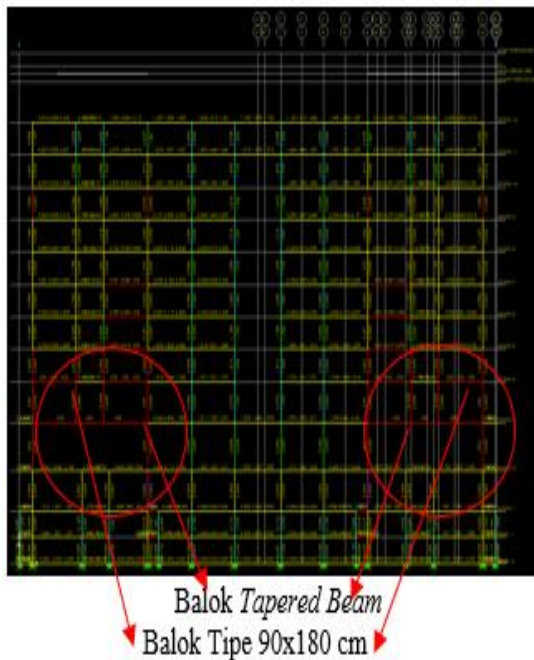
Hasil dari analisis struktur pada *SAP 2000* versi 11, diperoleh bahwa model struktur atap lantai 12 dinyatakan aman terhadap beban mati dan beban hidup.

3. Struktur Gedung

Hasil analisis struktur dapat digunakan jika telah memenuhi 90% ragam partisipasi massa. Pada studi ini ragam partisipasi massa telah memenuhi 90% pada mode shape 106. Studi ini akan memfokuskan perkuatan struktur untuk elemen struktur balok dan kolom terhadap beban gempa berdasarkan hasil analisis struktur pemodelan struktur gedung pada program *ETABS* versi 9.7.2.

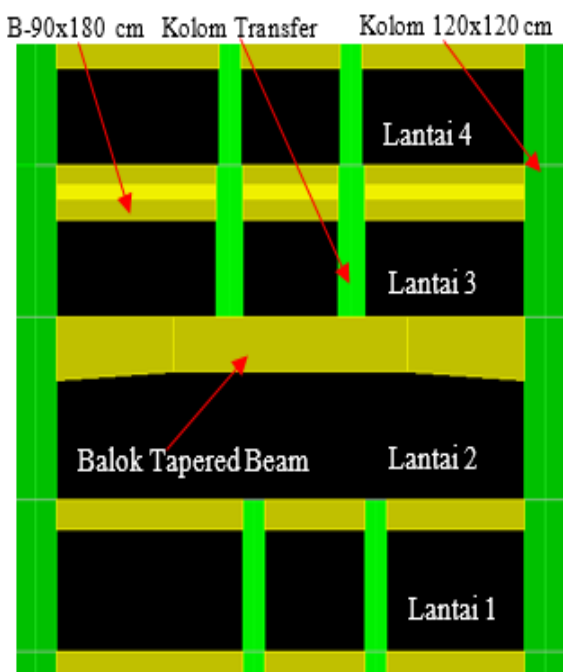
a) Evaluasi Elemen Balok Struktur balok yang lemah

Hasil analisis struktur *ETABS* menunjukkan bahwa beberapa elemen balok memerlukan perkuatan geser. Beberapa tipe balok terlihat *overstress* terhadap geser, artinya bahwa balok tidak mampu memikul beban geser pada kombinasi gempa. Balok yang paling lemah terhadap geser pada Gedung X adalah balok tipe *Tapered Beam (TB)* 120x210-180 cm di lantai 3 pada grid (C 1-2), (C 11'-12), (C 3-5), (C 9-10') (Gambar 10). Sedangkan balok tipe *Tapered Beam (TB)* berdimensi 120x210-180 cm yang berada di lantai 3 pada yang grid berbeda yaitu (B 1-4), (B 9-12), (D 1-4), (D 9-12), (E 1-4), (E 9-12), dinyatakan masih aman. Pada tipe balok *Tapered Beam (TB)* yang aman tetap juga direncanakan perkuatan untuk mengantisipasi kegagalan geser.



Gambar 10 Hasil analisis struktur/check design structures ETABS untuk balok TB (120x210-180) dan balok 90x180 cm pada potongan grid (C 1-2), (C 3-5), (C 9-10') dan (C 11'-12).

Balok-balok *Tapered Beam (TB)* terletak pada lantai 3 membentang dengan panjang hingga 21 m, yang berfungsi untuk menopang kolom transfer sehingga kondisi pada ruangan pada lantai 2 dimanfaatkan sebagai ruang aula tanpa kolom ditengahnya (Gambar 11).



Gambar 11. Bentuk balok *Tapered Beam* Pada pemodelan ETABS pada contoh potongan grid (C 1-2).

Hasil analisis struktur ETABS juga menunjukkan balok tipe lainnya yang lemah terhadap geser, akibat tidak mampu memikul kombinasi beban gempa, antara lain: balok tipe 40x70 cm di lantai 5-11 pada grid (F 1'-2), (F 11'-11''); balok tipe 40x70 cm di lantai 5-9 pada grid (6 D-E), (7 D-E); balok tipe 40x70 cm di lantai 5-7 pada grid (6 E-F), (7 E-F), balok tipe 45x85 cm di lantai 3-4 pada grid (6 E-F), (7 E-F), (6 D-E), (7 D-E); dan balok tipe 90x180 cm di lantai 4 pada grid (B 1-2), (B 11'-12), (B 3-5), (B 9-10'), (C 1-2), (C 11'-12), (C 3-5), (C 9-10'), (D 1-2), (D 11'-12), (D 3-5), (D 9-10'), (E 1-2), (E 11'-12), (E 3-5), (E 9-10')

Perkuatan struktur untuk balok yang lemah terhadap geser

Metode yang digunakan untuk memberikan perkuatan balok yang lemah terhadap geser yaitu pemberian lapisan CFRP berdasarkan ACI 440.2R-08 (Tabel 3). Karakteristik material CFRP yang digunakan, antara lain: tebal lapisan CFRP = 1,40 mm, $f_y = 2.790$ MPa, modulus elastisitas 155.000 MPa dan $density = 1,50$ g/cm³. Perkuatan dengan lapisan CFRP dipasang menggunakan perekat/epoxy yang mempunyai daya kuat lekat beton lebih besar dari 4 MPa dan modulus elastisitas epoxy sebesar 12.800 MPa.

Tabel 3. Analisis perkuatan balok menggunakan *CFRP*

Lantai	Grid Balok	Dimensi Cm	Vu kN	ϕ Vn kN	Wf* Mm	Sf* mm	Check
5-11	(F 1'-2), (F 11'-11''')	40x70	393,51	1.454,03	150	200	Aman
5-9	(6 D-E), (7 D-E)	40x70	527,89	1.454,03	150	200	Aman
5-7	(6 E-F), (7 E-F)	40x70	511,69	1.454,03	150	200	Aman
3-4	(6 E-F), (7 E-F)	45x85	755,98	1.865,34	150	200	Aman
3-4	(6 D-E), (7 D-E)	45x85	715,03	1.865,34	150	200	aman
4	(B 1-2), (B 11'-12)	90x180	2.778,21	6.364,93	200	200	aman
	(B 3-5), (B 9-10')	90x180	2.843,36	6.364,93	200	200	aman
	(C 1-2), (C 11'-12)	90x180	2.965,24	6.364,93	200	200	aman
	(C 3-5), (C 9-10')	90x180	2.996,04	6.364,93	200	200	aman
	(D 1-2), (D 11'-12)	90x180	2.724,64	6.364,93	200	200	aman
	(D 3-5), (D 9-10')	90x180	2.800,05	6.364,93	200	200	aman
	(E 1-2), (E 11'-12)	90x180	2.735,51	6.364,93	200	200	aman
	(E 3-5), (E 9-10')	90x180	2.697,43	6.364,93	200	200	aman
3	(B 1-4), (B 9-12)	TB (120x210-180)	6.968,12	17.175,44	300	100	aman
	(C 1-4), (C 9-12)	TB (120x210-180)	7.461,33	17.175,44	300	100	aman
	(D 1-4), (D 9-12)	TB (120x210-180)	6.896,09	17.175,44	300	100	aman
	(E 1-4), (E 9-12)	TB (120x210-180)	6.794,87	17.175,44	300	100	aman

Rekomendasi untuk jarak antar lapisan CFRP (Sf) dan lebar lapisan CFRP (Wf) telah diperhitungkan berdasarkan *ACI 440.2R-08*.

b) Evaluasi Elemen Kolom Struktur kolom yang lemah

Hasil analisis struktur *ETABS* menunjukkan tipe kolom yang lemah terhadap geser dan lentur, pada gedung X diantaranya: kolom tipe 30x60 cm di lantai B2-3 pada grid (-A'-1"), (-A'-11"), (-A'-3), (-A'-10'), (G-2'), (G-10"), (G-3'), (G-9'); kolom tipe 120x120 cm di lantai B2-3 pada grid (B-1), (B-12), (B-4), (B-9), (C-1), (C-12), (C-4), (C-9), (D-1), (D-12), (D-4), (D-9), (E-1), (E-12), (E-4), (E-9); kolom tipe 90x90 cm di lantai B2-2 pada grid (D-6), (D-7), (D-5"), (D-8), (F-6), (F-7), (E-6), (E-7), (E-5"), (E-8). Salah satu kolom yang terindikasi *overstress* terhadap geser adalah kolom tipe 120x120 cm di lantai 3 pada grid (D-1), (D-12) (Gambar 12). Kolom tersebut menerima beban balok dari tipe balok *Tampered Beam* dan beban pelat.

COMBO ID	STATION	LOC	CAPACITY RATIO	MAJOR SHEAR REINFORCEMENT	MINOR SHEAR REINFORCEMENT
KOMBTD	0		0,781	17,676	0,000
KOMBTD	1950		0,650	17,695	0,000
KOMBTD	3900		0,545	17,714	0,000
KOMBDA	0		0,469	0/S #3	0,000
KOMBDA	1950		0,327	0/S #3	0,000
KOMBDA	3900		0,452	0/S #3	0,000

Gambar 12 Hasil analisis struktur/*check design structures ETABS* untuk kolom tipe 120x120 cm

Pada area lift tidak ditemukan *core wall*, namun ditemukan kolom tipe L dan T yang dimanfaatkan sebagai pengaku dinding disudut-sudut lift. Dimensi kolom L dan T telah didesain oleh perencana sebagai pengikat dinding disekitar are lift, agar struktur menjadi lebih kaku dan mampu memikul beban yang diterimanya. Hasil analisis struktur *ETABS* menunjukkan kolom tipe L 40x40x20 cm dan

Ton. Kondisi eksisting jumlah tiang pancang pada *as built drawing* berjumlah 386 buah. Hasil evaluasi program *ETABS* untuk gaya aksial ultimit, diperoleh kebutuhan pancang berjumlah 359 buah. Hal ini menunjukkan selisih jumlah pancang pada kondisi eksisting dan hasil evaluasi sebesar 38 buah pancang. Sehingga dapat diketahui bahwa metode *concrete jacketing column* masih bisa diterapkan.

5. SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Hasil evaluasi struktur gedung X berdasarkan SNI 03-1726-2012, dapat disimpulkan bahwa gedung X, tergolong masih aman terhadap kinerja batas ultimit atau simpangan antar tingkat yang terjadi akibat pembebanan gempa dinamik. Hanya ditemukan beberapa titik balok dan kolom tertentu yang membutuhkan perkuatan struktur akibat tidak mampu menahan beban lentur dan beban geser akibat pembebanan gempa dinamik, sehingga membutuhkan perkuatan struktur.

Saran

- 1) Perlunya penanganan yang cepat dan tepat terhadap kerusakan non-struktural yang ditemukan, untuk mencegah kerusakan struktural.
- 2) Kolom transfer sebaiknya dihindari, karena apabila salah dalam perencanaan dapat berakibat balok yang menahan kolom transfer tersebut tidak mampu memikul beban sehingga membuat balok tersebut lemah terhadap geser, lentur dan torsi.
- 3) Analisis perhitungan dimensi kolom untuk menopang struktur lift harus lebih diperhatikan, khususnya kolom disudut lift. Sebaiknya kolom sudut untuk area lift direncanakan menggunakan konstruksi dinding geser beton *core wall*.
- 4) Perkuatan struktur kolom akibat metode *concrete jacketing column* harus mempertimbangan dampak pertambahan nilai gaya aksial.
- 5) Perlunya sosialisasi Peraturan Menteri Pekerjaan Umum Nomor 25/PRT/M/2007 tentang sertifikasi kelaikan fungsi bangunan gedung, khususnya gedung bertingkat lebih dari

10 lantai di Jakarta. Pemilik gedung diharapkan dapat melakukan audit evaluasi internal guna mendapatkan sertifikasi kelaikan fungsi bangunan dari Dinas Penataan Kota. Peraturan ini masih belum mendapat perhatian dari pengelola gedung, khususnya pada gedung objek penelitian, sehingga gedung X masih belum mendapatkan sertifikasi laik fungsi bangunan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [ACI] American Concrete Institute. 1998. ACI 440.2R-08. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. Farmington Hills (USA): ACI.
- Afriadi Y, Satyarno I. 2013. *Perbandingan spektra desain beberapa kota besar di Indonesia dalam SNI 2012 Gempa dan SNI 2002 [Internet]*. Konferensi Nasional Teknik Sipil 7, 24-26 Oktober 2013. Surakarta (ID) Universitas Sebelas Maret. hlm 299-305; [diunduh 2015 Juni 20]. Tersedia pada <http://sipil.ft.uns.ac.id/konteks7/prosiding/233S.pdf>
- Asrurifak M, Irsyam M, Hutapea, BM, Ridwan M, Prammatya AV, Dharmawansyah D. 2013. *Pengembangan Peta Klasifikasi Tanah dan Kedalaman Batuan Dasar untuk Menunjang Pembuatan Peta Mikrozonasi Jakarta Dengan Menggunakan Mikrotremor Array*. [Internet] 17th Annual Scientific Meeting 2013 November 13-14, Jakarta (ID). hlm. 67-72; [diunduh 2015 Agustus 23]. Tersedia pada: https://www.academia.edu/6296595/Pengembangan_Peta_Klasifikasi_Tanah_dan_Kedalaman_Batuan_Dasar_untuk_Menunjang_Pembuatan_Peta_Mikrozonasi_Jakarta_Dengan_Menggunakan_Mikrotremor_Array
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2013. SNI 03-2847-2013 *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta (ID): BSN.
- [BSN] Badan Standardisasi Nasional. 2012. SNI 03-1726-2012 *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta (ID): BSN.
- Budiono B, Supriatna L. 2011. *Studi Komparasi Desain Bangunan Tahan Gempa dengan Menggunakan SNI 03-*

- 1726-2002 dan RSNi 03-1726-201X.
Bandung (ID): ITB Pr.
- Christiawan I, Triwiyono A, Christady H.
2008. *Evaluasi kinerja dan perkuatan struktur gedung guna alih fungsi bangunan. Studi kasus: perubahan fungsi ruang kelas menjadi ruang perpustakaan pada lantai II gedung G Universitas Semarang. Forum Teknik Sipil.* 18(1): 725-738.
- El-Sayed AK. 2014. *Effect of longitudinal CFRP strengthening on the shear resistance of reinforced concrete beams. Composites.* 58:422-429.
doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.061.
- Naïm F. 1989. *The Seismic Design Handbook* [Internet]. New York (USA): Van Nostrand Reinhold. hlm 34; [diunduh 2014 Nov 27]. Tersedia pada:
https://www.google.com/?gws_rd=ssl#q=the+seismic+design+handbook+pdf&tbm=bks.
- Snell LM. 2012. Using the rebound hammer [Internet]. *Proceedings of The 11th Annual Mongolian Concrete Conference*, June 2012. hlm tidak disebutkan; [diunduh 2015 Juni 21]. Tersedia pada http://wt-us.com/pdf/snell_Hammer.pdf.